

大質量星への質量降着率とアウトフローの関係

松下 祐子 (九州大学大学院 理学府)

Abstract

観測から、大質量星から大質量のアウトフローが駆動することが分かっている。しかしながら、アウトフローがどのようにして駆動されているのか詳しいことは分かっていない。本研究では大質量星アウトフローを調べるために、数値シミュレーションを用いて、大質量星形成の計算を行った。この計算で、初期の分子雲の安定性 (α_0 : 熱エネルギーと重力エネルギーの比) をパラメータとした。 α_0 が小さいほど、初期のガス雲は重力的に不安定で、星への降着率が高い。解析の結果、アウトフローの質量は原始星の質量にのみ依存することが示された。これは、観測結果とよく一致する。また、アウトフローと質量降着率の比は、原始星質量には依らず、 $\sim 30\%$ になることが分かった。

1 Introduction

近年の観測から、星形成領域において、大質量原始星から、大質量アウトフローが放出されていることが示された。小質量星形成過程において、アウトフローが放出される事実は観測や数値計算によって研究されてきたが、大質量星からのアウトフローについての研究は少ない。大質量星は、その形成過程自体が明らかになっていないが、強い輻射の影響で広範囲に影響を与えるために、大質量星の形成過程の研究は重要である。

一般に、大質量星とは、 $\sim 8M_\odot$ 以上の星を指す。大質量星形成を、小質量星の場合と同じ条件で考えると問題が発生する。寿命問題と輻射圧問題である。寿命問題とは、小質量星の場合と同じ質量降着率では、大質量を獲得できないというものである。降着により質量が増加するタイムスケール

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_J}{t_{\text{ff}}} \quad (1)$$

(M_J はジーンズ質量、 t_{ff} は自由落下時間) と、中心星が収縮するタイムスケール

$$t_{\text{KH}} = \frac{GM^2}{RL_{\text{rad}}} \quad (2)$$

(GM^2/R はガス球の重力エネルギー、 L_{rad} は太陽光度) の関係から中心星が主系列に到達する時期が分かるため、そこから最終的な星質量が求められる。小質

量星形成における典型的な降着率 $10^{-5}M_\odot/\text{yr}$ では、中心星は $\sim 8M_\odot$ で主系列に達する。中心星の寿命 t_* の間、質量降着率 \dot{M} で降着し続けると、星質量は $\dot{M}t_*$ だけ増加する。小質量星と同程度の降着率では、 $30 - 40M_\odot$ までしか質量を増やせない。したがって、 $30 - 40M_\odot$ までの大質量星を作ることは出来るが、観測されている $100M_\odot$ や $150M_\odot$ の星を形成することは出来ない。輻射圧問題とは、降着流中のダストにはたらく輻射圧により降着が止まってしまうというものである。輻射圧は、 $L/4\pi r^2 c$ 、ラム圧は、 ρu^2 である。したがって、降着できる条件は、

$$\rho u^2 > \frac{L}{4\pi r^2 c} \quad (3)$$

また連続の式 $\dot{M} = 4\pi r^2 \rho u$ より、

$$\dot{M} > \frac{L}{cu} \quad (4)$$

大質量星では、 L (光度) が大きいため、 \dot{M} が大きくなければならない。ここからも、小質量星の場合と同じ降着率では中心星に物質が降着できないことが分かる。したがって、大質量星が形成されるには、大降着率が必要であることが分かる (図 1)。大質量星が大降着率を持つであろうことは、観測的にも支持されている (Sollins et al. 2005)。

大質量星は大降着率を持つという特殊な環境にあるにもかかわらず、大質量アウトフローの観測から (図 2) に示されているように、アウトフローの質量や運動量、エネルギーは原始星の質量 (または光度)

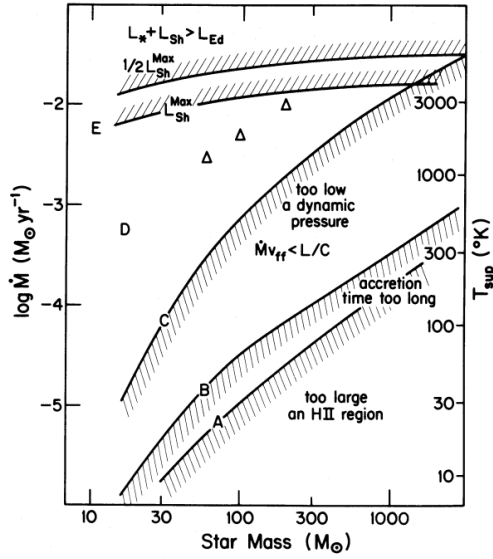


図 1: 原始星への質量降着率と降着により形成可能な上限質量の関係。D のみが形成可能な領域である (Wolfire & Cassinelli, 1987)。

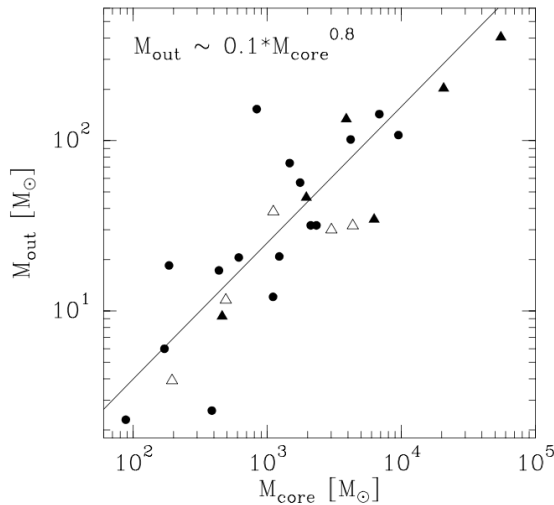


図 2: 分子雲アウトフローの質量とコア質量の関係 (Beuther et al. 2002)。

のみに依存するという結果が得られている (Beuther et al. 2002; Wu et al. 2004)。

そこで本研究では、大質量アウトフローの駆動要因を解明することを目的として、数値シミュレーション

を用いて大質量星の計算を行った。初期の分子雲の質量を変化させることで重力的に不安定な状況を作り出し、星への降着率をパラメータとした。つまり、不安定であるほど、大降着率を持つ。

2 Methods

表 1: モデルごとの初期設定

Model	f	M_{cl} [M_{\odot}]	R_{cl} [pc]	B_0 [μG]	Ω_0 [$10^{-14}/\text{s}$]	α_0	β_0	γ_0	μ
A	1.4	32		20		0.25			
B	1.7	39		22		0.21			
C	2.0	46		24		0.18			
D	3.4	77		31		0.10			
E	4.2	96	0.28	34	5.2	0.08	0.02	0.1	2
F	8.4	192		48		0.04			
G	17	385		68		0.02			
H	34	771		97		0.01			
I	67	1542		136		0.005			

本研究で行った数値シミュレーションは、大質量星を形成する分子雲の進化を計算するために、Resistive-MHD 方程式を Nested grid 法を用いて解いている。Nested grid 法とは、中心にいくほど解像度を上げていく手法で、それぞれのグリッドでのセルは $(i,j,k)=(64,64,32)$ としており、 $z=0$ の面に対称性を課している (Machida et al. 2005a,b)。また、sink を使用しており、中心の数密度が $n_{\text{thr}} = 10^{13} \text{cm}^{-3}$ となったところで星が形成されたと仮定している。以上の方法は、小質量星形成過程で行ったものと同じである (Machida & Hosokawa 2013)。Resistive-MHD 方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P - \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B}) - \rho \nabla \phi \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B} \quad (7)$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho \quad (8)$$

ここでは、エネルギー方程式、輻射輸送を考える代わりに、パロトロピックな状態方程式を仮定をしている。

$$P = c_{s,0}^2 \rho \left[1 + \left(\frac{\rho}{\rho_c} \right)^{2/5} \right] \quad (9)$$

ここで、 $c_{s,0}$ は初期分子雲における音速、 ρ_c は臨界密度である。

初期状態として、Bonnor-Ebert 密度プロファイルを持つ分子雲コアを用意した。中心密度は $\rho_{c,0} = 3.8 \times 10^{-19} \text{gcm}^{-3}$ 、温度は $T_{\text{iso}} = 40\text{K}$ とした。A ~ I のモデルを計算したが、そのモデルごとの初期設定は表 1 に示した。 $\alpha_0 = E_{\text{th}}/E_g$ (熱エネルギー/重力エネルギー)、 $\beta_0 = E_{\text{rot}}/E_g$ (回転エネルギー/重力エネルギー)、 $\gamma_0 = E_{\text{mag}}/E_g$ (磁気エネルギー/重力エネルギー) である。パラメータ f を用いて、初期分子雲コアの質量と初期分子雲の安定性 α_0 を変化させた。質量降着率は $\propto \alpha_0^{-3/2}$ であると考えられているので、高い降着率を獲得しようとする場合は、 f を大きく (α_0 の値を小さく) し、初期の不安定性を増加させた。高い降着率をもつものが大質量星になると考えられているため (Wolfire & Cassinelli, 1987)、ここでは f が大きくなるほど質量の大きい大質量星が形成される。ただし、本研究では、原始星からのフィードバックは無視しているため、フィードバックの影響が重要ではないと考えられている $\sim 10M_{\odot}$ (Krumholz et al. 2007, 2009) までの計算となっている。また、光度の計算については、星進化コードを用いて、質量降着率と原始星質量から星の進化を計算して求めた (Machida & Hosokawa 2013)。

3 Results & Discussion

計算結果を図 3 - 6 に示す。図 3 から、どのパラメータの場合においても、横軸を中心星質量にした場合、アウトフローの質量は同じ値を持つことが分かる。したがって、アウトフロー質量は、質量降着率に依らず、原始星の質量に強く依存していることが分かる。

図 4 から、光度が増加するにつれて、アウトフローの質量が増加することが見て取れる。原始星の質量が大きいほど光度も大きくなるので、アウトフロー

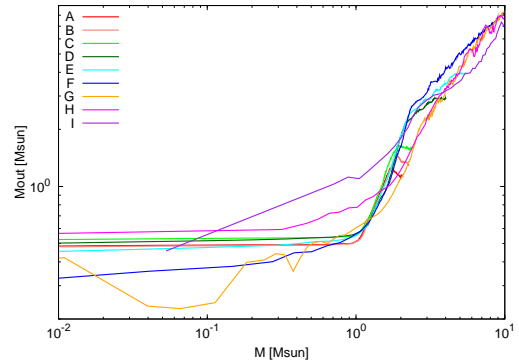


図 3: 分子雲アウトフロー質量とコア質量の関係

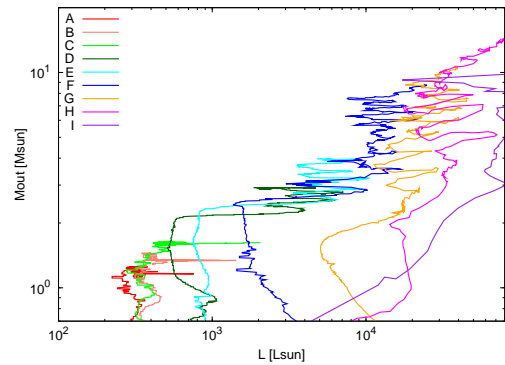


図 4: 分子雲アウトフローの質量と全総量光度

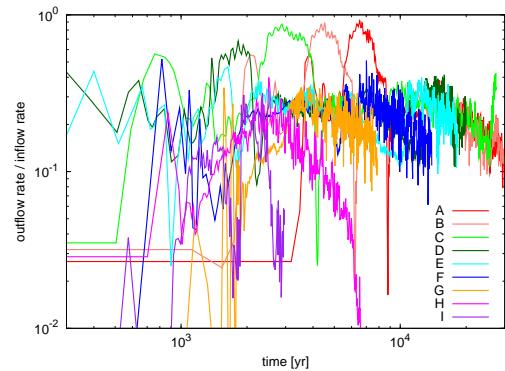


図 5: 質量降着率とアウトフロー率の比の時間変化

質量は、原始星の質量 (光度) に強く依存していることが分かる。

図 5、図 6 から、アウトフロー率と質量降着率の比は、質量降着率依存性はないことが分かる。おおよ

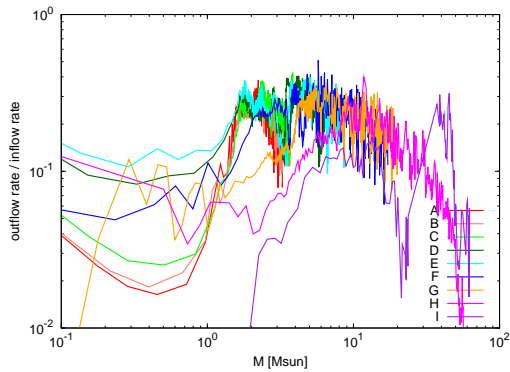


図 6: 質量降着率とアウトフロー率の比とコア質量との対応

そ、アウトフロー率と質量降着率の比は 20 - 30% 程度で一定の値をとる。星形成時におけるアウトフローの先行研究において、アウトフロー率は降着率の約 1/3 となる (Tomisaka 1998) ことが示されており、その結果とも一致する。つまり、大質量星でも、小質量星でも、ほぼアウトフロー率と質量降着率の比は $\sim 30\%$ で一定であるという結果が得られた。質量降着率、中心星質量による依存性が見られないことから、アウトフローの駆動メカニズムは大質量星でも小質量星でも同じであると考えられる。

4 Conclusion

アウトフロー質量は、原始星の質量に強く依存し、原始星質量が増加すればアウトフロー質量も増加することが示された。また、アウトフローと質量降着率の比は、質量降着率や原始星質量に依らず一定で、 $\sim 30\%$ になることが示された。

Acknowledgement

本研究を行うにあたり、多くのご指導を頂きました町田正博准教授に深く感謝いたします。また、共同研究してくださっている細川隆史助教授、櫻井裕也さんに深く感謝いたします。基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04)、野辺山宇宙電波・太陽

電波観測所及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

- Beuther, H., et al., 2002, A&A, 383, 892B
- Kurumholz, M. R., Klein, R. I., & McKee, C. F., 2007, ApJ, 656, 959
- Machida, M. N., Matsumoto, T., Tomisaka, K., & Hanawa, T. 2005, MNRAS, 362, 369
- Machida, M. N., Matsumoto, T., Hanawa, T., & Tomisaka, K. 2005, MNRAS, 362, 382
- Machida, M. N., & Hosokawa, T. 2013, MNRAS, 431, 1719
- Sollins, P. T., Zhang, Q., Keto, E., & Ho, P. T. P., 2005, ApJ, 624, 49
- Tan, J. C., et al., 2014, prpl.conf 149
- Tomisaka, K., 1998, ApJ, 502, 163
- Wolfore, M. G., & Cassinelli, J. P., 1987, ApJ, 319, 850
- Wu, Y., et al., 2004, A&A, 426, 503